Bull. Ecol., 1980, t. 11, 1, p. 11-31.

DYNAMIQUE COMPARÉE DE L'EAU SOUS HÊTRAIE ET DANS DES COUPES NUES OU A *CALAMAGROSTIS EPIGEIOS* EN FORÊT DE FONTAINEBLEAU

par M. FARDJAH et G. LEMÉE

avec la collaboration technique

de J. Y. PONTAILLED

Laboratoire d'Ecologie Végétale,
Université de Paris-Sud, 91405 Orsay

RÉSUMÉ

La répartition des précipitations et leur utilisation dans le sol par le couvert végétal ont fait l'objet d'observations comparées entre une hêtraie naturelle et une coupe à sol dénudé ou colonisé par un peuplement de Calamagrostis epigeios. L'interception nette, quantité d'eau n'atteignant pas le sol, est plus élevée sous la hêtraie que sous la calamagrostidaie en toutes saisons. L'interception par les litières, dont la décomposition est lente, n'est pas négligeable.

Le sol lessivé comprend trois horizons à caractères hydriques différents; ceux qui ont la plus grande capacité de rétention (A_1 humifère et B argileux) renferment la plus grande quantité de racines. En phase d'assèchement, ils fournissent pour l'évapotranspiration la plus grande quantité d'eau, le potentiel hydrique s'égalisant rapidement dans le profil. En cas de sécheresse prolongée, le point de fanaison permanente n'atteint que les 25 cm supérieurs sous la surface nue, alors qu'il intéresse le profil entier sous végétation. La recharge à la capacité de rétention est rétablie rapidement dans le sol nu, mais lentement sous la Graminée et encore plus sous la hêtraie. Le drainage annuel en profondeur diminue dans le même sens.

L'épuisement rapide de l'eau disponible constitue une cause déterminante de l'échec de la régénération naturelle dans les peuplements de Calamagrostis.

SUMMARY

Comparison of water dynamics in a beech forest, in bare soil and in a Calamagrostis epigeios stands in the Fontainebleau forest.

Distribution of precipitations and their use as soil water by the plant cover as been measured in this three station. Net interception (amount of water not reaching the ground) is higher for the beech forest than for the Calamagrostis stand at all seasons. It is not negligible for litters, that exhibit a slow decomposition.

Leached soil has three horizons with different moisture characteristics; those having the higher field capacity (A_1 humic and B clayed) contain the higher amount of roots. In a drying out phase, they give the higher amount of water for evapotranspiration, the water potential becoming rapidly the same in the profile. In case of a severe drought, the permanent wilting point is only reached on the whole profile under vegetation, whereas it is only reached on the top 25 cm for bare soil. Recovery of soil moisture to field capacity occurs more quickly in bare soil, but slowly under the grass and even more so under the beech forest. Natural deep drainage decreases accordingly.

Rapid exhaustion of available water is a determining cause of failure in natural regeneration in Calamagrostis stands.

INTRODUCTION

Les formations forestières impriment à leur habitat des caractères propres qui constituent avec celles-ci des états d'équilibre momentané évoluant selon les modifications subies. Il en est ainsi de la circulation de l'eau qui a fait l'objet de nombreux travaux, soit sur la répartition des précipitations par l'écran végétal, soit sur les variations de la réserve hydrique du sol, soit sur les sorties par drainage, ruissellement ou évapo-transpiration, soit même sur la recherche d'un bilan complet. En ce qui concerne cette dernière, citons pour l'Europe occidentale les travaux de RUTTER (1964, 1965, 1966) sur des plantations de pins sylvestres en Angleterre, de SCHNOCK (1971) sur une forêt feuillue mélangée en Belgique, de LOSSAINT et ses collaborateurs (ETTEHAD, LOSSAINT et RAPP, 1973) sur la chênaie d'yeuse en Languedoc.

Les comparaisons quantitatives sur la répartition et l'économie de l'eau dans des peuplements forestiers denses ou éclaircis et des surfaces entièrement déboisées ont fait également l'objet de nombreux travaux en raison de leur intérêt pour la sylviculture, l'alimentation des cours d'eau et la protection contre l'érosion. L'estimation, difficile, des sorties d'eau hors du système a été réalisée, selon les cas, par mesure des variations de la réserve du sol, du débit d'émissaires de bassins-versants ou du niveau de nappes phréatiques.

Cependant le cas des peuplements herbacés qui s'installent et s'étendent fréquemment dans les coupes et les clairières ne paraît pas avoir fait l'objet d'observations précises. Parmi les Graminées sociales qui forment des peuplements denses dans ces situations, le *Calamagrostis epigeios* ou « roseau des bois » est particulièrement fréquent sur les sols forestiers bien drainés et modérément acides du Bassin parisien, où il constitue alors un obstacle à la régénération et aux plantations. La forêt de Fontainebleau est propice à une telle recherche sur la dynamique comparée de l'eau dans la futaie fermée et dans les coupes à sol nu ou colonisé par des espèces sociales telles que le *Calamagrostis*. L'acquisition d'une bonne connaissance écologique des stations retenues pour nos observations, la proximité du laboratoire de Biologie végétale d'Avon ainsi que le soutien financier accordé par la DGRST dans le cadre d'un contrat pour l'étude de la régénération du chêne et du hêtre en collaboration avec le Centre national de Recherches forestières de Nancy-Amance ont été d'une aide efficace pour la réalisation de ce travail, qui a couvert les années 1974, 1975, 1976 et le début de 1977.

I. — SITUATION GÉNÉRALE ET CARACTÈRES HYDRIQUES DU CLIMAT

Les stations retenues pour l'étude de la dynamique comparée du cycle de l'eau sont situées sur le large plateau de calcaire de Beauce qui s'étend, à l'altitude moyenne de 135 mètres, à quelques kilomètres au nord-ouest de l'agglomération de Fontainebleau.

Les caractères hydriques du *climat local* du massif forestier de Fontainebleau ont quelques particularités par rapport aux régions voisines du bassin parisien (DOIGNON, 1977). La pluviosité y est plus élevée d'environ 17 % tout en se répartissant de façon assez uniforme sur toute l'année (Tableau I). L'évapotranspiration climatique potentielle a été calculée d'après la formule de TURC (1961) :

$$ETP_{mm/mois} = 0{,}4 \frac{t}{t + 15} (I_g + 50) \quad (1)$$

où t est la température moyenne de l'air sous abri et I_g le rayonnement solaire global en cal cm^{-2} jour^{-1}. On a utilisé les valeurs de rayonnement mesurées par la Station de Bioclimatologie de l'INRA à Versailles. Le Tableau I montre un déficit moyen des précipitations sur l'ETP étalé sur 6 mois, d'avril à septembre.

TABLEAU I

Caractères hydriques du climat à Fontainebleau

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Totaux annuels
Précipitations (mm) (1)	55	45	53	53	60	63	63	50	55	74	63	64	697
Nombre de jours avec précipitation (1)	14	12	14	12	12	11	12	10	11	15	13	115	151
ETp (mm)	6,5	10,6	37,4	65,4	94,1	115,1	115,3	99,4	68,4	37,2	15,3	8,3	673
P − ETp (mm)	48,5	33,5	15,6	− 12,6	− 34,1	− 53,1	− 52,3	− 49,4	− 13,4	36,8	47,7	55,7	23,1

(1) Fontainebleau-Ville, moyennes sur 88 ans (1883-1970).

II. — DESCRIPTION DES STATIONS

Trois placettes proches les unes des autres, différant seulement par leurs conditions de couvert végétal, ont été choisies :

1) Une *futaie fermée de hêtres,* à l'intérieur de la Réserve biologique de la Tillaie, constitue un peuplement naturel, inexploité, en équilibre avec le climat et le sol locaux. La placette, à 250 m de la lisière sud, la plus proche, couvre une surface de 420 m²; elle comporte 16 arbres d'âge très différent, de hauteur échelonnée entre 11 et 38 m et de diamètre à 130 cm compris entre 11,5 et 100 cm. Le sol est dépourvu de végétation herbacée et muscinale. On trouvera une description détaillée de l'ensemble de la parcelle (n° 272 du nouveau plan d'aménagement) dans les publications de BOUCHON *et al.* (1973) et de LEMÉE *et al.* (1978).

2) Un peuplement de *Calamagrostis epigeios,* ou « roseau des bois », Graminée très envahissante dans les clairières et les coupes en forêt de Fontainebleau, a été choisi dans la parcelle 292, ancienne « réserve artistique », à 300 m de la lisière sud de la Réserve de la Tillaie. La placette a été établie sur une vaste surface dégagée, encadrée de quelques fourrés de hêtres. La structure et l'évolution de ces peuplements ont été décrites par FAILLE et FARDJAH (1977).

3) Une placette de 16 m² a été établie à environ 30 m de la précédente, sur une surface sans *Calamagrostis* et entièrement débarrassée des plantes éparses qui y croissaient.

MORPHOLOGIE ET CARACTÈRES PHYSIQUES DES SOLS.

Le sol des trois stations est aussi semblable que possible. C'est un sol lessivé qui s'est différencié dans toute l'épaisseur de la couverture de sables éoliens provenant essentiellement des sables de Fontainebleau des pentes avoisinantes. Epais de 75 à 80 cm aux endroits choisis, ils reposent sur un matériau mélangé de graviers et sable calcaire, de limon et d'argile provenant de la décomposition de la surface du calcaire de Beauce, fossilisée depuis la dernière glaciation par les sables éoliens et ayant subi un brassage avec ceux-ci par cryoturbation.

Ce sol a fait l'objet de descriptions par A. M. ROBIN (1968). Il comprend des horizons bien différenciés :

1) un horizon humifère A_1 gris brun, épais en moyenne de 8 cm, sableux, formant des agrégats très instables en raison de sa pauvreté en argile, mais où l'activité biologique est active;

2) un horizon lessivé sableux A_2, jaune clair, sans structure construite, jusqu'à 35 à 40 cm;

3) une zone de transition A_2B, enrichie irrégulièrement en argile et en fer, épaisse d'une dizaine de centimètres;

4) un horizon B brun rouge, compact, enrichi en argile et en fer, épais de 25 à 30 cm.

Le substrat C est formé de calcaire très altéré et mêlé d'un peu de sable, plus ou moins riche en pierres calcaires.

Le Tableau II donne *l'analyse granulométrique,* carbonates de l'horizon C inclus, du profil de chacune des 3 stations. A tous les niveaux, la fraction sableuse entre 0,1 et 0,2 mm est fortement dominante, l'horizon B se différenciant cependant par une forte proportion d'argile.

La densité apparente et la porosité totale ont été établies selon diverses méthodes qui ont fourni des résultats concordants. Nous donnons au Tableau III les résultats obtenus pour la porosité totale avec la méthode des cylindres de Burger après 5 répétitions par niveau. L'horizon supérieur, humifère, a la porosité la plus grande, avec cependant une valeur nettement plus élevée dans le peuplement de roseau des bois que dans les deux autres stations, dépourvues de végétation herbacée. L'horizon A_2, dépourvu de structure, a une porosité faible, mais c'est horizon B qui, colmaté par de l'argile et de l'oxyde de fer, a la plus grande compacité.

Caractères hydriques des sols.

a) *Conductivité hydraulique saturée.*

On a utilisé un infiltromètre mis au point par Colombani *et al.* (1972), qui est une modification de la méthode de Müntz par l'adjonction d'un cylindre extérieur concentrique destiné à assurer la pénétration verticale de l'eau dans le sol (voir Bonneau

Tableau II

Composition granulométrique des sols

Hor.	Prof. (cm)	Arg.	Limons (mm)		Sables (mm)					Mat. org.
			0,002-0,02	0,02-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5-1	1-2	
		Futaie de hêtres								
A_1	0-8	3,85	8,6	6,5	12,1	50,7	13,25	0,3	0	3,8
A_2	8-40	5,45	8,4	6,8	12,8	59,5	6,3	0,4	0	0,3
A_2B	40-50	9,65	8,55	5,5	12,95	54,7	7,65	0,7	0	0,3
B	50-77	15,6	9,5	7	10,75	48,85	5,9	0,5	0	0,2
C	80-95	6,4	7,1	8,4	8,9	60	3,3	3,3	0	0,3
		Coupe à *Calamagrostis*								
A_1	0-8	4,85	7,85	3,75	10,25	54	13,55	0,6	0	5,15
A_2	8-40	5,75	9	8,1	10,55	57,7	7,2	0,8	0	0,95
A_2B	40-50	11,9	9,9	9,4	11,15	50,75	5,9	0,6	0	0,45
B	50-77	17,27	9,05	7,9	12,4	42,55	7,2	0,55	0	0,1
C	80-95	7,1	8,6	6,3	9,65	52,6	10,35	1,4	4	0
		Coupe à sol nu								
A_1	0-8	5,7	7,6	4,65	13,6	52,9	11,25	0,6	0	3,7
A_2	8-40	6,4	9,25	8,45	11	58,25	5,5	0,6	0	0,45
A_2B	40-50	10,15	9,65	7,8	11,8	51,5	8,25	0,5	0	0,3
B	50-75	16,05	9,35	6,5	11,3	46,75	9,25	0,8	0	0,3
C	80-95	5,6	7,95	4,9	9,3	58,05	7,3	3,75	3,15	0

TABLEAU III

Densité apparente, D_a, et porosité totale P_t, en % du volume total

Hor.	Prof. (cm)	Futaie		Coupe à *Calamagrostis*		Coupe à sol nu	
		D_a	P_t	D_a	P_t	D_a	P_t
A_1/A_2	0-10	1,02	54	0,92	58	1,12	52
A_2	10-20	1,25	44	1,37	45	1,29	45
A_2	20-30	1,33	42	1,47	41	1,48	41
A_2	30-40	1,39	40	1,50	41	1,47	41
A_2B	40-50	1,51	37	1,54	38	1,55	38
B	50-60	1,6	30	1,61	31	1,6	31
B	60-70	1,65	28	1,66	29	1,66	28
B/C	70-80	1,63	28	1,64	30	1,62	30
C	80-90	1,54	36	1,55	35	1,5	37

in DUFAUCHOUR, 1970, p. 65) (1). Après environ 10 minutes, la vitesse d'infiltration se stabilise à la valeur de la conductivité saturée. Les résultats, qui figurent au Tableau IV, montrent une bonne perméabilité d'ensemble avec cependant un minimum accentué dans l'horizon B qui règle ainsi les mouvements descendants des eaux d'infiltration. En fait, on n'a observé nulle part de stagnation au niveau de cet horizon, qui ne montre d'ailleurs aucun indice d'anaérobiose.

TABLEAU IV

Conductivité hydraulique saturée des différents horizons.

Horizon	Futaie	Clairière à *Calamagrostis*
A_1	24×10^{-6} m sec^{-1}	–
A_2	$14{,}8 \times 10^{-6}$ "	$17{,}8 \times 10^{-6}$ m sec^{-1}
B	$6{,}1 \times 10^{-6}$ "	$8{,}7 \times 10^{-6}$ "
C	$15{,}3 \times 10^{-6}$ "	–

b) *Capacité de rétention matricielle (« capacité au champ »).*

Diverses techniques de mesure ont été utilisées et comparées (FARDJAH, 1978). Avec différents auteurs, tels BONNEAU (1961), HILLEL (1974), BETREMIEUX (1975), nous avons retenu comme les plus représentatives les déterminations *in situ* en périodes pluvieuses de saison fraîche. Faites tout d'abord par prélèvements à la tarière, ces mesures ont ensuite été réalisées au moyen d'une sonde Solo mise au point par le C.E.A. La mise en évidence de paliers d'humidité constante constituant le critère préconisé par RODE (1960) pour établir la valeur de la capacité de rétention du sol en place a fourni les données figurant au Tableau V (2). On voit que celle-ci a deux maxima, l'un dans l'horizon humifère de surface, lié à la matière organique, l'autre dans l'orizon B en relation avec sa teneur assez élevée en argile. Ces valeurs sont très voisines dans chaque station à toutes les profondeurs, la réserve totale du sol représentant de 206 à 210 mm de précipitations.

c) *Point de fanaison permanente et réserve disponible pour les plantes.*

Le point de fanaison permanente, représenté par le contenu en eau au potentiel de — 16 bars (ou pF de 4,2) qui est la limite inférieure des possibilités

(1) L'appareil, prêté gracieusement par le laboratoire des sols de l'I.N.R.A. à Versailles, a les principales caractéristiques suivantes : profondeur d'enfoncement des cylindres, 6 cm; diamètre intérieur du cylindre de mesure, 112 mm; diamètre de l'anneau de garde, 320 mm; charge d'eau au-dessus de la surface de sol, 3 cm.

(2) Parmi les méthodes de laboratoire utilisées, celle de mise en équilibre d'échantillons humides soumis à une pression appropriée sur des plaques de porcelaine poreuse (DAUDET, 1970) a fourni les résultats les plus proches des valeurs observées *in situ* en même temps qu'elle est d'application rapide; la pression exercée différait selon la texture des horizons de 75 mb pour les 10 cm supérieurs à 1000 mb pour l'horizon B argillique.

TABLEAU V

Caractéristiques hydriques moyennes des profils, en % de terre sèche et en mm équivalents de hauteur d'eau

Hor.	Prof. cm	Capacité au champ % t.s.	Capacité au champ mm	Point de fanaison % t.s.	Point de fanaison mm	Eau disponible % t.s.	Eau disponible mm
A_1	0-5	26,0	13,2	6,6	3,3	19,45	9,8
A_{1-2}	5-10	17,1	9,7	2,85	1,7	14,25	8,05
A_2	10-40	11,8	49,2	2,8	11,7	9,0	37,5
A_2B	40-50	14,65	22,35	5,15	7,8	9,5	14,55
B	50-80	18,7	91,5	9,34	45,7	9,36	45,8
C	80-90	14,8	22,7	7,33	11,3	7,47	11,45
	Total		208,65		81,5		127,15

d'absorption de l'eau par les mésophytes, a été mesuré au moyen de la presse à membrane type Richards. Le Tableau V montre que cette valeur suit parallèlement celle de la capacité de rétention dans les profils.

La réserve disponible pour les plantes, tranche d'humidité comprise entre la capacité de rétention matricielle et le point de fanaison permanente, présente les mêmes variations verticales, mais atténuées. Elle est comprise, pour l'ensemble du profil, entre 124 et 130 mm de précipitation.

d) *Relations humidité – potentiel hydrique.*

Le potentiel matriciel de l'eau du sol, dont les gradients constituent un des termes des déplacements de l'eau, a été établi en conditions d'assèchement par extraction de l'eau sous pressions croissantes entre — 0,075 et — 16 bars, puis à l'aide d'enceintes à pression de vapeur contrôlée pour les valeurs inférieures à — 16 bars (DAUDET, 1970). La figure 1 représente les courbes obtenues pour les différents horizons des 3 profils, chaque point mesuré représentant une moyenne de 10 échantillons. On voit qu'à potentiel égal (remplacé par commodité par le pF, valeur logarithmique) le contenu pondéral en eau du sol augmente dans l'ordre A_2 - A_1 - C - B, avec une exception pour la clairière à *Calamogrostis* où, en raison de la plus grande richesse de l'horizon supérieur A_1 en matière organique, l'ordre devient A_2 - C - A_1 - B.

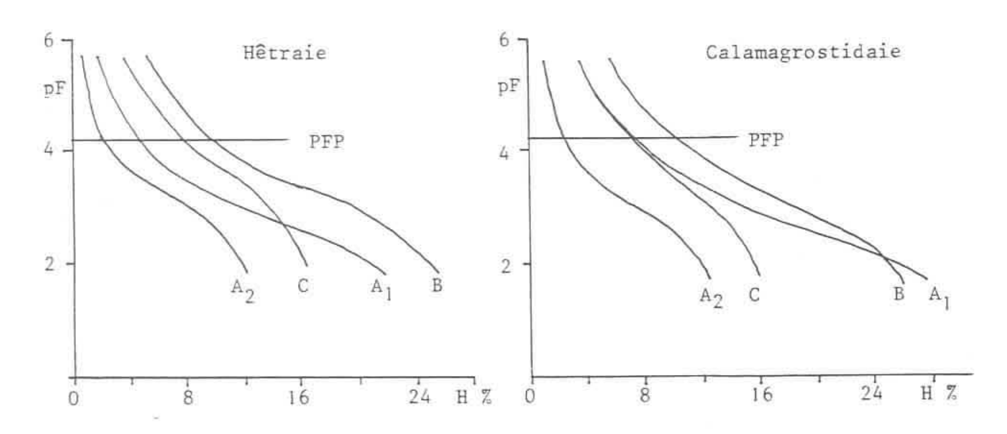


FIG. 1. — Courbes des relations entre la teneur pondérale en eau, H, et le potentiel hydrique exprimé en valeurs logarithmiques de pF, dans les différents horizons du sol sous hêtraie et sous calamagrostidaie. P. F. P. : point de fanaison permanente (pF 4,2).

RÉPARTITION VERTICALE DES RACINES.

La répartition des racines dans le profil est d'importance capitale pour l'assèchement des différents horizons et pour l'évapotranspiration. Le Tableau VI donne les valeurs obtenues. On remarque que le *Calamagrostis,* dont l'appareil souterrain a fait l'objet d'une étude approfondie (FAILLE et FARDJAH, 1977), présente à tous les niveaux une masse de racines plus grande que celle des racines du hêtre, mais dans les deux cas la densité est maximale dans l'horizon humifère A_1, minimale en A_2, puis augmente à nouveau en B, en relation avec la plus grande capacité en eau de cet horizon. Les racines de la Graminée peuvent pénétrer dans la partie supérieure du substrat sablo-calcaire C où elles forment des ramifications denses, mais courtes. Il en est de même du hêtre qui enfonce des racines subverticales proches de la souche dans ce substrat.

TABLEAU VI

Masse des racines, en g m^{-2}, *sur une épaisseur de* 10 cm *par horizon, et masse totale par* m^2 *de sol.*

Horizons	Hétraie (1)	*Calamagrostis*
A_1	326	430
A_2	19	73
B	91	102
Profil total	675	1030

(1) Racines fines seulement, de diamètre maximum de 1 mm.

III. — RÉPARTITION DES APPORTS D'EAU MÉTÉORIQUE

Les différents termes du bilan de la répartition des eaux météoriques au sol sous un couvert végétal sont représentés par l'égalité suivante :

$$P = Eg + Ec + In$$

où la pluie incidente P est répartie entre une fraction Eg de pénétration directe et d'égouttement jusqu'au sol, une fraction Ec qui atteint celui-ci par écoulement le long des branches, des troncs et des tiges et un reste In qui n'atteint pas le sol et que l'on peut qualifier d'interception nette.

MÉTHODES.

La mesure des précipitations incidentes a été faite par des batteries de 9 pluviomètres disposés sur une surface dépourvue de végétation, tout d'abord à quelques centaines de mètres des stations d'études, puis sur la station sur sol nu. Une comparaison entre ces deux points maintenue sur plusieurs mois a montré qu'il n'y avait pas entre elles de différences significatives. La surface totale de réception de la pluie était de 507 cm^2.

1) *L'eau d'égouttement* sous la futaie de hêtre a été recueillie au moyen de 20 pluviomètres fixes représentant une surface totale de réception de 1 127 cm^2, disposés en deux lignes parallèles distantes de 50 cm et suivant le rayon d'une couronne de hêtre âgé sur une longueur de 5 m. La comparaison statistique des prélèvements hebdomadaires dans chaque pluviomètre a mis en évidence une faible variabilité spatiale en relation avec l'homogénéité du couvert à l'échelle de temps de plusieurs mois ou d'une année entière, comme le montrent les valeurs du Tableau VII.

Des mesures semblables faites en d'autres points sous la futaie de la Tillaie entre 1971 et 1973 avaient fourni une variabilité spatiale de même ordre.

L'égouttement sous le *Calamagrostis* a été mesuré dans deux peuplements comprenant chacun une ligne de 20 pluviomètres à équidistance de 50 cm, la hauteur de ceux-ci ayant dû être réduite à 8 cm et affleurant de 1 à 2 cm au-dessus de la surface de la litière. La variabilité spatiale est ici très élevée en raison des différences ponctuelles dans la densité des organes aériens : le coefficient de variation pour une année de mesures était respectivement de 22,2 % dans les deux peuplements.

2) *L'eau d'écoulement* sur les troncs a été recueillie, suivant la méthode décrite par AUSSENAC (1968),

TABLEAU VII

Variabilité spatiale de l'eau d'égouttement recueillie par semaine et par pluviomètre

	Intervalle de confiance, en mm			Coefficient de variation $\left(V=\frac{100\,s}{\overline{X}}\right)$		
	1974	1975	1976	1974	1975	1976
phase feuillée (1)	1,34	0,93	0,66	4,17	7,33	7,4
phase défeuillée (2)	1,74	1,43	0,3	4,03	6,18	5,7
année entière	0,75	0,35	0,12	3,8	3,8	3,12

(1) Fin mai à mi-octobre (2) Mi-novembre à fin avril

par des gouttières en matière plastique ceinturant le tronc suivant une spirale à hauteur comprise entre 1 m et 1,40 m, le contact avec l'écorce était rendu étanche au moyen d'un mastic spécial. L'eau ainsi recueillie était collectée dans des bidons enfoncés dans des cavités pratiquées au pied des troncs. La mesure était réalisée chaque semaine au moyen d'une éprouvette graduée avec une précision de 10 cm^3.

L'eau d'écoulement sur les feuilles et chaumes du *Calamagrostis* ne pouvant être mesurée directement, nous avons apprécié leur capacité d'interception nette In, quantité d'eau maximale susceptible d'être retenue par les parties aériennes (parties vivantes + parties mortes non incorporées à la litière), soit par ressuyage par du papier-filtre et mesure de l'augmentation de poids de celui-ci sur une surface donnée d'un peuplement ayant subi une aspersion d'eau importante, soit par immersion de quelques minutes des parties aériennes coupées, puis égouttées selon leur position naturelle, avec pesée avant et après l'opération. L'interception nette a été ainsi évaluée à 1,33 g par g de matière sèche à 100 °C, ce qui représente 0,4 mm de précipitations pour les peuplements étudiés dont la biomasse aérienne moyenne (matière vivante + matière morte sur pied) était de 300 g m^{-2} de matière sèche. Le dénombrement des précipitations supérieures à 0,4 mm pendant une période donnée permet une approximation par défaut de la tranche d'eau retenue par interception pendant celle-ci. On peut ainsi déduire la valeur Ec de la formule (1) dont on connaît les autres termes.

RÉSULTATS.

1) *Cas de la futaie de hêtres.*

a) *Egouttement et pénétration directe, Eg.*

Les résultats obtenus pendant 6 années de mesures dans 4 stations de la Tillaie font l'objet du Tableau VIII. On constate une différence systématique, bien qu'inégale, en faveur de la phénophase défeuillée. Cette différence a varié en effet entre 2 % et 12,5 %, pour une valeur moyenne de 7,1 %.

On constate également un plus grande variabilité interannuelle en phase feuillée qu'en phase défeuillée. L'analyse statistique des résultats groupés en périodes de 4 semaines couvrant les 6 années met mieux en relief cette différence avec un nombre de mesures $n = 28$:

	phase feuillée	phase défeuillée
erreur standard de la moyenne	4,6	1,82
coefficient de variation, $100\,s/\overline{X}$	32,5 %	11,8 %

Cette variabilité provient des différences dans l'intensité et la durée des précipitations. Sa valeur plus élevée en phase feuillée provient au moins en partie de la plus grande capacité d'interception : des observations en conditions d'averses isolées nous ont montré que le palier de 70-75 % d'égouttement n'est atteint que pour des précipitations de 2,5 à 3 mm, valeurs de l'ordre de celles obtenues sous hêtraie en Tchécoslovaquie par SLAVIK (1965) et en Ardennes par BULTOT *et al.* (1972) ou sous peu-

TABLEAU VIII

Egouttement sous futaies de hêtres

	P annuel mm	Egouttement					
		Phase feuillée (1)		Ph. défeuillée (2)		Année	
		mm	% de P	mm	% de P	mm	% de P
Futaie très âgée							
1971 (3)	465	205	65,7	98,5	78,2	324	69,8
1972	591	184	70	242	80	441	74,7
Futaies jeunes							
17-08-72 au 16-08-73	487	116	75,3	207	77,3	367	75,5
	487	114	73,9	212	79,3	374	76,8
Futaie d'âge multiple							
1974	610	194	76,2	173	82	478	78,4
1975	785	319	82,5	273	86,2	658	83,8
1976	481	149	70,2	176	80,4	353	73,4
Moyennes	570	194	73,4	196	80,5	437	76,6
Erreur standard de la moyenne		5,1	11,92	2,72	1,12	9,28	1,63

(1) Fin mai à mi-octobre (2) Mi-novembre à fin avril (3) Depuis le 4 mars

plements mixtes de feuillus en Belgique (SCHNOCK et GALOUX, 1967)et en Lorraine (AUSSENAC, 1968).

A l'échelle de l'année entière, on remarque, pour les mêmes raisons, une relation positive entre l'augmentation de pluviosité et celle du taux d'égouttement.

b) *Ecoulement sur les troncs, Ec.*

Une surface englobant celle des mesures d'égouttement a été délimitée. Elle comprenait 16 arbres de taille très différente comprise entre 12 et 100 cm de diamètre à 1,30 m et entre 11 et 38 m de hauteur; la projection horizontale des couronnes couvrait 420 m².

Les résultats des mesures hebdomadaires pendant deux années consécutives font l'objet du Tableau IX. Ils montrent une différence significative en faveur de la phénophase défeuillée, l'écran foliaire et une plus grande dessiccation des surfaces corticales constituant sans doute les causes déterminantes de l'écoulement relatif plus faible en phase feuillée. Le taux

TABLEAU IX

Ecoulement sur les troncs de hêtres

	P annuel mm	Ecoulement					
		Phase feuillée (1)		Phase défeuillée (2)		Année	
		mm	% de P	mm	% de P	mm	% de P
1975	787	19,3	5	28,3	8,9	51,3	6,5
1976	481	8,8	4,2	19,1	8,7	29,3	6,1
Moyenne	634	14	4,6	23,7	8.8	40,3	6,3

(1) Fin mai à mi-octobre (2) Mi-novembre à fin avril.

d'écoulement significativement moins élevé en 1976, année sèche, qu'en 1975, année humide, pendant cette même phase paraît s'expliquer également par la déshydratation plus importante des écorces et de leurs épiphytes. On trouve pour l'écoulement, comme pour l'égouttement, une corrélation élevée avec le volume des précipitations ($r = 0{,}91$ en 1975; 0,82 en 1976). Enfin il existe une liaison linéaire hautement significative entre l'écoulement individuel et le diamètre des troncs ($r = 0{,}94$ en 1975; 0,91 en 1976). Une telle relation a été signalée par AUSSENAC (1970).

Parmi les nombreux travaux réalisés sur la répartition des précipitations en milieux forestiers, ceux qui concernent des hêtraies ont fourni des résultats proches des nôtres (EIDMANN, 1959, NOIRFALISE, 1959, MITSCHERLICH et MOLL in NOIRFALISE et VANESSE, 1975). Toutefois BRECHTEL (in NOIRFALISE et VANESSE, 1975) observa un égouttement plus faible (54 %) compensé par un écoulement plus important (20 %). Pour des peuplements feuillus mélangés en Haute Belgique (SCHNOCK, 1967, 1968, 1971), les valeurs moyennes d'égouttement et d'écoulement sont très proches des nôtres.

2) *Cas des peuplements de* Calamagrostis epigeios.

Les méthodes mises en œuvre ont été décrites ci-dessus. En raison de la persistance sur pied des chaumes et des feuilles en saison hivernale, aucune différence significative saisonnière n'a été observée. Les résultats, qui figurent au Tableau X, bien que n'ayant pas la précision de ceux de la hêtraie, montrent cependant que l'eau qui atteint la surface de la litière emprunte en proportion nettement supérieure la voie de l'écoulement, en raison de la géométrie très différente du feuillage à composante verticale importante, et de la forme en gouttière des limbes. L'interception nette est sensiblement moindre que celle de la hêtraie, qui retiendrait environ 7 % de plus des précipitations.

On dispose de peu d'informations sur l'interception par des peuplements herbacés. Elle montre, comme les formations forestières, une relation avec le volume des précipitations. Le taux d'interception nette est de 10 % pour des espèces prairiales recevant 100 mm, avec une capacité de rétention de 1,2 mm (BURGY et POMEROY, 1958); STOLTENBURG et WILSON (in BURGY et POMEROY, 1958) trouvèrent une capacité de rétention de 0,6 mm environ et BEARD (in RIJTEMA 1966) 2 mm pour des cultures prairiales. Nos résultats se situent à la limite inférieure de cette marge.

3) *L'écran-litière.*

L'eau qui parvient à la surface de la couverture de litière ne pénètre pas en totalité dans le sol. Lorsque cette couverture morte présente un déficit par rapport à sa capacité de rétention d'eau, la pénétration des précipitations assure d'abord cette recharge avant de pénétrer dans le sol. Si les tissus des feuilles de hêtres récemment tombés ne s'imbibent que lentement du fait de l'imperméabilité des cuticules, ces feuilles retiennent entre elles des lames d'eau capillaire; quant aux feuilles d'un an et plus, leur pénétration par de nombreux organismes rend leur embibition rapide. Des prélèvements de litière ef-

TABLEAU X

Bilan annuel de la répartition des précipitations dans la hêtraie et dans la calamagrostidaie

	P	Egouttement		Ecoulement		Interception nette	
	mm	mm	%	mm	%	mm	%
Hêtraie (moy. 1975-76)	634	498	78,6	40	6,3	96	15,1
Calamagrostis (1975)	785	432	55	290	37	63	8

TABLEAU XI

Capacité de saturation en eau des feuilles de la litière de hêtre

	Quantité de litière, g m^{-2} (1)	Contenu en eau % du poids sec (2)	Equivalent en mm de précipitations
Litière fraîche, L	340	260	0,96
Litière ancienne, F	700	250	1,93
Total, L + F	1040	257	2,89

(1) Séchée à 100°C.
(2) Poids sec à l'air libre à environ 20 °C.

fectués en automne après de fortes pluies, ont permis d'établir la capacité de saturation de celle-ci sur sol lessivé. Cinq échantillons de 40 surfaces de 0,25 m^2 chacune furent prélevés après la chute des feuilles. Les résultats, qui font l'objet du Tableau XI, montrent que la capacité de saturation par la litière, débris autres que les feuilles non compris, varie entre l'équivalent de 1,93 mm de pluie avant la chute automnale des feuilles et 2,9 mm après celle-ci.

Cette capacité de rétention, bien qu'elle soit de l'ordre de celle du couvert végétal, évapore son eau beaucoup moins rapidement. Cependant, à la fin de longues périodes printanières ou estivales sans pluie, ce stock est épuisé; la litière immobilise alors un minimum de 1,9 mm de pluie avant que celle-ci ne pénètre dans l'horizon humifère. Ainsi un prélèvement fait en août, après seulement 11 jours de sécheresse succédant à quelques journées pluvieuses, montra un déficit hydrique équivalent à 2 mm de précipitations. Or, de 1974 à 1977, il y eut 12 périodes sans pluie de plus de 10 jours d'avril à septembre, ce qui représente une immobilisation supérieure à 6 mm par an pour ces seules périodes. BODEUX (1954) attribuait une interception annuelle de 9,64 % par une litière de chênaie dont la masse est cependant plus faible que celle de notre hêtraie. Dans les chênaies du Tennessee, pour une quantité de litière sensiblement égale aux nôtres, BLOW (1955) a estimé à 1,3 mm la quantité d'eau retenue après chaque pluie isolée et à 25 mm la quantité retenue par an, soit 2 % des précipitations.

Des observations semblables faites sur la litière des peuplements de *Calamagrostis* représentant environ 370 g de matière sèche par m^2 ont montré une capacité de rétention en eau équivalant à 1,5 mm de précipitations. Aucune mesure de vitesse de dessiccation in situ n'a été faite, mais on peut penser que celle-ci est sensiblement plus rapide que celle de la litière sous forêt, en raison des conditions évaporatives plus efficaces.

Il faut rappeler que, par contre, la litière joue un rôle positif dans la protection de l'eau du sol contre l'évaporation superficielle; cet effet de « self-mulching » est cependant faible sous couvert forestier : selon FLETCHER et LULL (1963), l'enlèvement de la litière dans une forêt de *Quercus* et *Carya* n'augmente le taux d'assèchement que d'environ 10 %. Celle-ci joue sans doute un rôle protecteur plus efficace dans les peuplements de *Calamagrostis*.

IV. — DYNAMIQUE DE L'EAU DU SOL

L'évolution de l'état hydrique aux différents niveaux de chacun des profils a été suivie au cours de la phase feuillée en 1974 et 1975 au moyen de prélèvements à la tarière, à raison de quatre sondages par station. Elle a été établie d'avril 1976 à avril 1977 au moyen de l'humidimètre à neutrons Solo avec, par station, quatre tubes d'aluminium fermés hermétiquement à la base.

L'évolution du potentiel hydrique fut observée depuis 1975 par la mise en place de sondes en plâtre de type Bouyoucos à 5 et 10 cm, puis tous

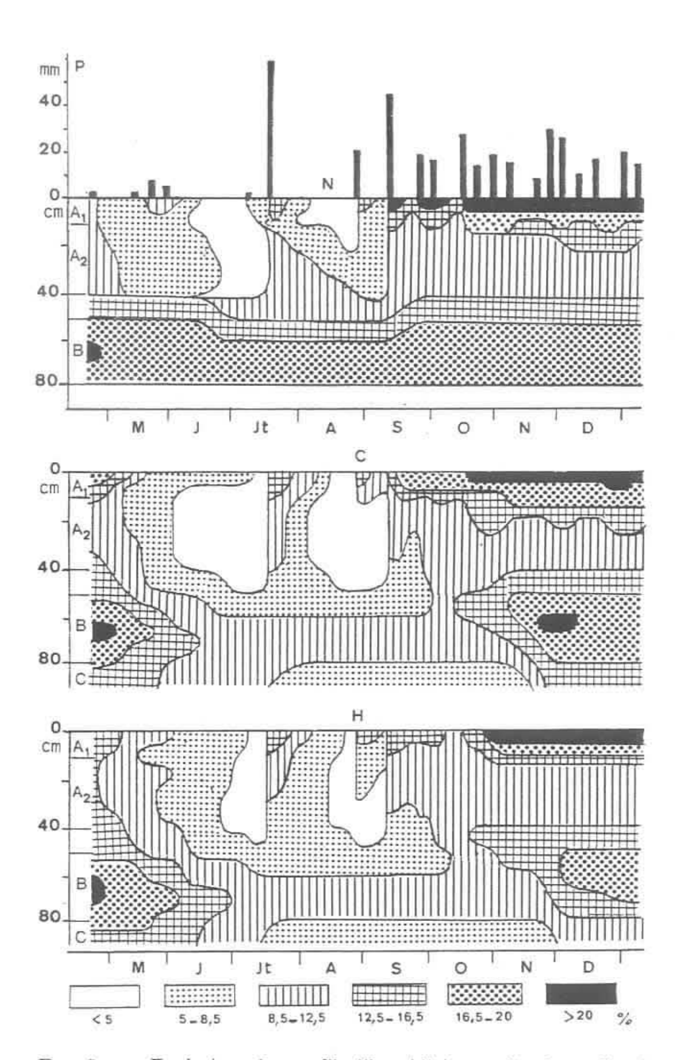


FIG. 2. — Evolution du profil d'humidité, en % du poids de terre sèche, entre fin avril 1976 et début janvier 1977 dans le sol nu (N) et colonisé par *Calamagrostis* (C) d'une coupe ancienne, et sous une hêtraie voisine (H).
P : précipitations hebdomadaires.

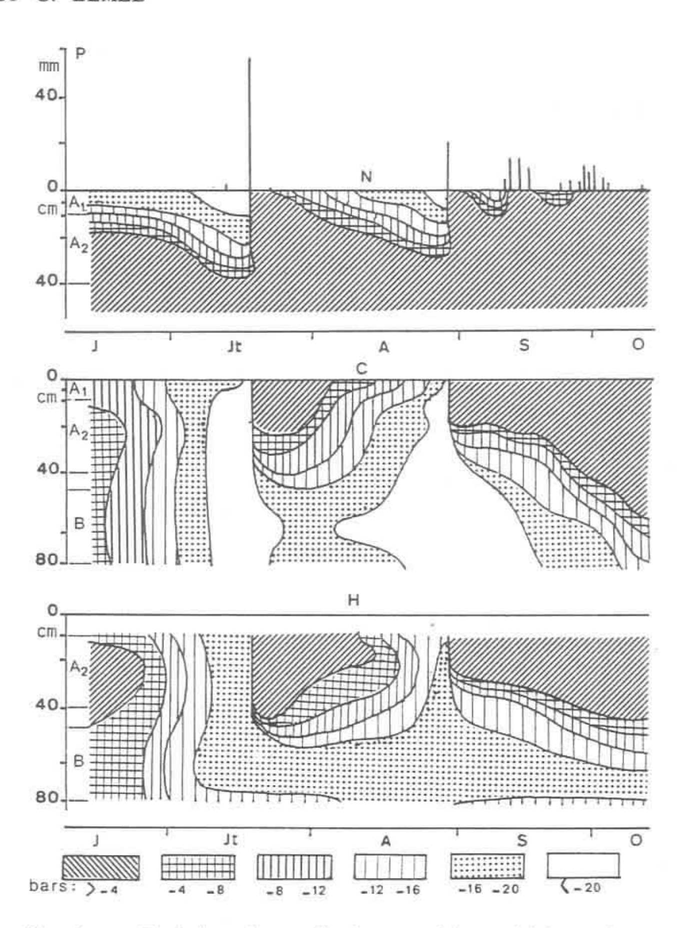


FIG. 3. — Evolution du profil de potentiel matriciel, en bars, de juin à octobre 1976, dans le sol nu (N) et colonisé par *Calamagrostis* (C) d'une coupe ancienne et sous une hêtraie (H).
P : précipitations journalières.

les 10 cm jusqu'à la base des profils nous ont conduit à utiliser, à partir de 1976, des micropsychromètres Wescor basés sur l'effet Peltier (SPANNER, 1951). On trouvera une description de cette méthode et de son utilisation par VERNET *et al.* (1970) et VALANCOGNE et DAUDET (1974). Six psychromètres ont été installés dans chaque station à des profondeurs de 5, 10, 20, 40, 65 et 80 cm et les mesures faites chaque semaine (FARDJAH, 1978).

Les observations de l'année 1976, qui fut particulièrement sèche, font l'objet de la figure 2 pour l'évolution de la teneur pondérale en eau et de la figure 3 pour celle du potentiel hydrique.

1) *Cas du sol sans végétation*

Lorsqu'une période sèche intervient au printemps ou en été, la surface du sol, non protégée contre le rayonnement et les mouvements de l'air, s'assèche rapidement. Même au cours de brèves périodes sans pluie comme en septembre 1976 (fig. 2 et 3), un assèchement notable se produit dans les 10 cm supérieurs. Par sécheresses prolongées, comme celle

de mai à août 1976, coupée le 17 juillet par une forte averse de 57 mm, la réserve utile pour les plantes fut épuisée jusqu'à 25 cm et entamée progressivement jusqu'à 40 cm avant cette averse; 40 jours après celle-ci, ces valeurs atteignirent respectivement 15 et 30 cm. Il en est résulté entre la surface et le front d'assèchement, particulièrement au voisinage de ce dernier, un gradient serré de potentiel hydrique. La réserve d'eau est demeurée intacte dans les niveaux plus profonds, intéressant les horizons A_2B et B.

2) *Cas du peuplement de Calamagrostis*

A la différence du sol nu voisin, le sol colonisé par la Graminée subit dans toute son épaisseur des pertes d'eau dès les premiers jours de sécheresse. Ceci est la conséquence de la colonisation intensive de tous les horizons par les racines du *Calamagrostis*.

En fin août 1974, après deux mois assez secs (39 mm du début juillet au 29 août), l'épuisement de la réserve utile pour les plantes était atteint dans tout le profil. En 1975, une période sans pluies du 21 juillet au 6 août amena cet épuisement jusqu'à une profondeur de 40 à 45 cm alors que celui-ci n'était atteint qu'à 15 cm dans le sol nu.

En 1976, la première période sèche, qui débuta fin avril, provoqua un assèchement plus précoce en surface, mais qui intéressa dès juin tout le profil de façon uniforme comme le montre la disposition verticale des lignes d'isopotentiel (fig. 3). Fin juin, la réserve utile était entièrement épuisée. La très forte averse du 17 juillet rechargea le sol à la capacité de rétention dans les 25 à 30 cm supérieurs et le ramenait au-dessus du point de fanaison vers 45 cm, mais la seconde période sèche provoqua à nouveau un épuisement de l'eau disponible à partir des niveaux réhumectés inférieurs, devenant total vers le 20 août. On constate cependant le maintien sous la surface d'un assèchement moins complet, comme le montre le potentiel hydrique plus élevé, malgré l'abondance des racines dans l'horizon supérieur, ce qui suggère une alimentation de ce dernier par les fortes rosées qui sont fréquentes dans les peuplements de roseau des bois jointe à une protection efficace de la couche de litière. Une pluie de 21 mm le 29 août ramena à nouveau le sol à la capacité de rétention jusqu'à 20 cm et les pluies ultérieures conduisirent à une recharge totale du profil à la fin de novembre. Au cours de cette période, la réhumidification s'amorce précocement au-dessous de 40 cm comme le montre l'évolution des courbes d'isopotentiel de — 20 et — 16 bars; ce phénomène, qui n'a pas été observé dans la hêtraie, pourrait être attribué à une descente préférentielle d'eau dans les cavités des racines mortes de la Graminée ou par une exsorption par les racines vivantes sous l'effet d'une inversion du gradient de potentiel hydrique entre celles-ci et le sol.

3) *Cas de la hêtraie*

L'évolution du profil hydrique sous hêtraie s'est montrée très semblable à celle de la calamagrostidaie. Elle s'en distingue cependant par une atténuation et un ralentissement des variations. Ainsi en 1975 la réserve utile ne fut épuisée à aucun niveau alors qu'elle le fut dans la moitié supérieure du profil sous peuplement de *Calamagrostis*. En 1976, le point de fanaison ne fut atteint dans la totalité du sol qu'une semaine après le peuplement de *Calamagrostis* lors du premier épisode sec, et deux semaines dans les 40 cm supérieurs au cours du second (fig. 3). La figure 3 montre en outre que le potentiel hydrique ne dépassa pas — 20 bars, à la différence du sol sous calamagrostidaie où il resta inférieur pendant 8 semaines dans l'horizon B.

Cette atténuation des effets de la sécheresse sous hêtraie peut s'expliquer partiellement, pour l'horizon supérieur, par le faible pouvoir évaporant et par l'effet de mulch joué en période sèche par la litière épaisse. C'est cependant dans les 10 cm supérieurs qu'on observe l'abaissement le plus rapide du potentiel hydrique malgré une capacité en eau plus grande que dans l'horizon sous-jacent; ceci est très vraisemblablement lié à la grande densité du réseau racinaire dans l'horizon supérieur.

Ce caractère atténué des variations hydriques du sol sous hêtraie par rapport au sol sous peuplement

graminéen se retrouve dans les périodes de recharge en eau qui sont plus lentes dans le premier que dans le second. Ainsi en 1976, après la reprise des pluies fin août, le début de la recharge en eau utile pour la croissance n'atteignit la base du profil qu'au début de décembre et la réserve ne fut entièrement reconstituée que vers la fin de ce mois alors que sous le peuplement de *Calamagrostis* ces deux états étaient atteints respectivement dès le début d'octobre et la fin de novembre. L'interception des averses par le couvert, qui n'en laisse pénétrer que 75 % en moyenne par égouttement (l'écoulement n'étant pas perceptible à quelque distance des troncs, où avaient lieu nos mesures) alors que le peuplement de roseau des bois laisse passer au moins 90 %, peut suffire à expliquer cette plus grande lenteur de la recharge en eau du sol.

4) *Essai de bilan hydrique du sol*

Dans le cas de nos sols, qui se trouvent sur des surfaces horizontales et ne sont pas alimentés par une nappe, le bilan hydrique présente les composantes suivantes :

$$\Delta R = P - (ETR + D) \qquad (3)$$

ΔR : variation de la réserve totale en eau du sol pendant le temps considéré;

P : précipitations pendant le même temps;

ETR : évapotranspiration effective dans le même temps, comprenant l'évaporation à travers la surface du sol ou de la litière, la transpiration du couvert et l'évaporation de l'eau interceptée par celui-ci, In (voir formule 2);

D : drainage à la base du sol.

Le drainage D n'ayant pu être mesuré, la connaissance de ETR, P et ΔR permet de le déduire de la formule (3). Deux situations sont à considérer :

1) le contenu en eau du sol est à tous les niveaux égal ou supérieur à sa capacité de rétention : l'évapotranspiration ETR est alors dépendante de l'évapotranspiration potentielle ETP. Cette dernière a été calculée selon la formule de TURC (voir formule 1, p. 3). On a retenu la relation :

$$ETP = ETR_s + In \qquad (4)$$

où ETR_s est l'émission de vapeur d'eau en provenance du sol directement et par transpiration. L'excédent de précipitations passe dans le drainage;

2) le contenu en eau du sol est inférieur, au moins à certains niveaux, à sa capacité de rétention : le terme D de la formule générale (3) disparaît ainsi que le terme P s'il n'y a pas de précipitations :

$$ETR_s = \Delta R \qquad (5)$$

Nous donnons ci-dessous les résultats de ces évaluations pour l'été 1975 et pour l'année entière1976.

a) *En 1975*, année humide, deux brèves périodes déficitaires en précipitations intervinrent et provoquèrent une baisse des réserves d'eau du sol (fig. 4), sans atteindre cependant l'épuisement de la réserve utile globale. La valeur la plus basse de celle-ci fut de 92 mm, soit 72 %, dans le sol nu, de 50 mm, soit 40 % sous la futaie et atteignit 20 mm, soit 15,5 %, sous le peuplement de *Calamagrostis*.

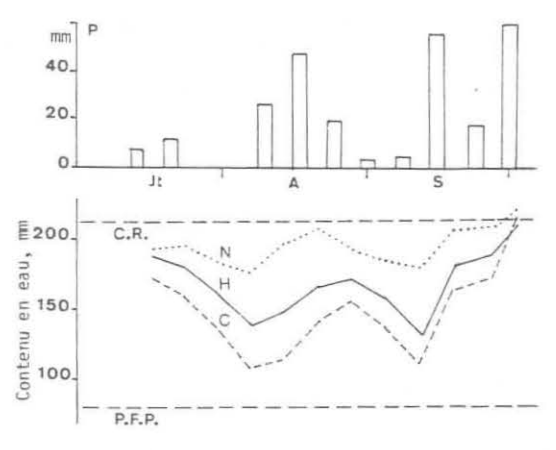


FIG. 4. — Evolution du contenu en eau, en mm, dans un sol nu (N) et colonisé par *Calamagrostis* (C) dans une coupe ancienne, et sous une hêtraie (H) en été 1975. P : précipitations hebdomadaires; C. R. : capacité de rétention du profil; P. F. P. : contenu en eau au point de fanaison permanente.

Pendant la période où le contenu en eau du sol est resté inférieur à sa capacité, l'évapotranspiration a été de beaucoup la moins élevée dans la coupe à sol nu, comme le montre le Tableau XII par suite du rôle de « self-mulching » joué par la rapide dessiccation de l'horizon supérieur qui protège contre l'évapotranspiration les horizons plus profonds.

TABLEAU XII

Bilan hydrique de la période de déficit en eau du sol au cours de l'été 1975

	Sol nu 16-07/26-09	Calama-grostidaie 16-07/01-10	Futaie 16-07/01-10
P, mm	187	250	250
In, mm	0	20	36
ETR_s	135	232	220
ETR totale (ETR_s + In)	135	252	266
P – ETR totale	+ 52	– 2	– 16

TABLEAU XIII

Bilan hydrique de la période de déficit en eau du sol en 1976

	Sol nu 21-04/06-10	Calama-grostidaie 21-04/01-12	Futaie 21-04/08-12
P, mm	190	302	328
In, mm	0	26	75
ETR_s	172	280	224
ETR totale	172	306	299
P – ETR totale	+ 18	– 4	+ 29

L'ETR_s à partir des réserves d'eau du sol a été un peu plus faible sous la hêtraie que sous la calamagrostidaie, mais on doit rappeler l'importance de l'interception nette In, de telle sorte que l'ETR globale y est légèrement supérieure. En fait, cette dernière valeur reste sous-estimée dans le cas de la hêtraie, celle-ci s'alimentant pour une faible part au sein du substrat calcaire.

La comparaison au cours de la même période entre entrées (P) et sorties (ETR totale) montre un excès des apports dans le sol nu, même si l'on tient compte de la recharge de 22 mm intervenue entre le début et la fin de cette période; cette discordance semble provenir d'une évaporation importante, après les fortes averses, de l'eau stagnant dans les faibles dépressions de la surface du sol sous l'effet d'une porosité sensiblement diminuée de l'horizon humique dénudé.

b) *En 1976*, année de sécheresse exceptionnellement longue, le contraste entre l'évolution des réserves hydrique du sol nu et celle des sols couverts de végétation fut encore plus marqué (fig. 5). La réserve utile se réduisait à 40 % de sa valeur maximale sous sol nu alors qu'elle s'épuisait totalement par 2 fois sous l'action de la transpiration de la végétation. Une période pluvieuse s'établissant vers la fin d'août, la réserve d'eau fut totalement reconstituée fin septembre dans le sol nu, mais seulement fin novembre sous *Calamagrostis* et fin décembre sous hêtraie. Les valeurs du Tableau XIII conduisent aux mêmes conclusions que pour 1975. Cependant la futaie a montré un excès des précipitations sur l'ETR totale, à la différence de l'année précédente, qui pourrait être dû à une participation plus importante de la réserve hydrique au-dessous du sol actuel, qui n'a pu être prise en compte et qui serait alors de l'ordre de 30 mm.

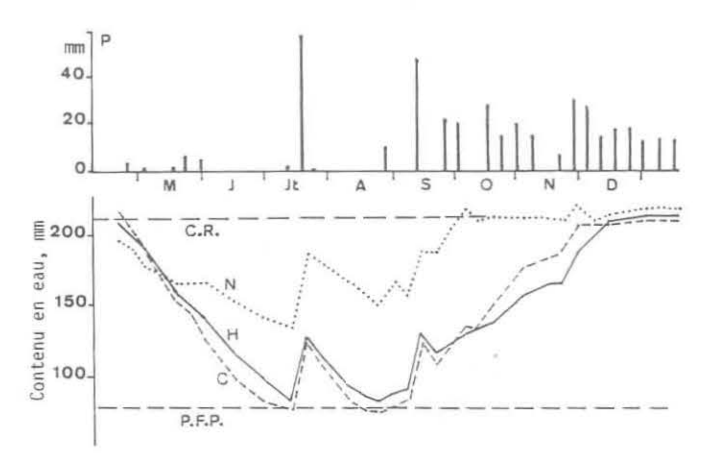


FIG. 5. — Evolution du contenu en eau dans un sol nu (N) et colonisé par *Calamagrostic* (C) dans une coupe ancienne, et sous une hêtraie (H) entre fin avril 1976 et janvier 1977. P : précipitations hebdomadaires; C. R. : capacité de rétention du profil; P. F.P. : point de fanaison.

On peut tenter d'établir un bilan du cycle de l'eau pour l'année 1976 entière en utilisant la formule (4) pour les mois non déficitaires. Pour les quatre premiers mois de l'année, nous trouvons :

$$\text{ETR totale} = 134 \text{ mm}$$
$$\text{In} = 15 \text{ mm}$$
$$\text{d'où } ETR_s = 119 \text{ mm}$$

Les précipitations pénétrant dans le sol n'ayant été excédentaires par rapport à l'ETR_s qu'en janvier et février, le drainage estimé pour ces deux mois a été de 58 mm en sol nu, de 51 mm sous *Calamagrostis* et de 36 mm sous futaie.

Pendant les périodes sèches du 25 avril au 28 août, séparées par la forte averse du 17 juillet, l'ETR totale a été la suivante :

sol nu : 114 mm, soit en moyenne 0,91 mm jour^{-1};

calamagrostidaie : 177 mm, soit en moyenne 1,41 mm jour^{-1};

hêtraie : 167 mm, soit en moyenne 1,34 mm jour^{-1}.

L'ETP calculée par la formule de Turc ayant été pour la même période de 3,8 mm jour^{-1}, on voit que l'évapotranspiration a été réduite entre 24 % de celle-ci sur le sol nu et 37 % dans le peuplement graminéen.

La période de recharge automnale était terminée fin septembre dans le sol nu (fig. 5) et le drainage pouvait alors reprendre à partir d'octobre; en considérant que l'ETR est devenue au maximum égale à l'ETP, on obtient une valeur de drainage au plus de 119 mm. Le drainage put reprendre sous le peuplement de *Calamagrostis* en décembre et représenter un maximum de 50 mm pour ce mois. Mais le drainage ne peut reprendre que vers la fin de décembre sous hêtraie, soit 20 mm environ.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'analyse des phases du cycle de l'eau dans les 3 stations étudiées a mis en évidence des différences importantes entre celles-ci, que représente la figure 6.

Le sol sans végétation absorbe le plus d'eau en l'absence d'écran végétal, mais n'en absorbe cependant pas la totalité. Sa faible porosité, ainsi que les petites inégalités de la surface, provoque une stagnation locale de l'eau sur cette surface dans les cas de pluies assez fortes et prolongées, qui est évaporée partiellement. Ce retour direct dans l'atmosphère est, en saison chaude, de l'ordre de 20 mm. En périodes sèches, la dessiccation intervenant à partir de la surface protège de plus en plus les parties plus profondes; il en résulte un profil hydrique dont la partie supérieure correspond au sol séché à l'air et la partie inférieure à la capacité de rétention matricielle, ces deux niveaux étant séparés par une zone à gradient de potentiel hydrique serré. Cette zone était comprise entre 25 et 40 cm dans les conditions de sécheresse prolongée de 1976, valeur semblable à celle qui a été établie en conditions expérimentales par différents auteurs (par ex. HENIN, 1957, HENIN et MONNIER, 1961). Dans ces conditions, la recharge en eau de l'ensemble du sol est rapide et le drainage important.

Le même sol colonisé par un peuplement de *Calamagrostis epigeios* a un comportement hydrique très différent. L'interception par la strate aérienne, en moyenne de 8 % toute l'année, celle de la litière dont la décomposition est lente, réduisent la pénétration dans le sol plus qu'en l'absence de végétation. Par contre, les pertes par évapotranspiration sont plus importantes du fait de la colonisation dense de l'ensemble du profil par les racines de la Graminée qui, en cas de période de sécheresse prolongée, épuise toute l'eau disponible. En 1976, l'ETR totale a représenté 380 mm dont 332 en provenance du sol, ce qui représente 79 % des précipitations de cette même année, proportion certainement supérieure à celle d'une année à pluviométrie normale. Le drainage est corrélativement réduit : il représente 70 mm de moins que sous le sol nu voisin.

La hêtraie se distingue par une capacité d'interception nette élevée : 15 % en moyenne, plus de 20 % en 1976, à laquelle s'ajoute la rétention par la litière évaluée à 10 mm annuellement. Il entre donc sensiblement moins d'eau dans le sol : la différence était évaluée à 60 mm pour 1976. Ceci explique au moins en partie que la partie de l'ETR provenant du sol n'ait pas été supérieure en année sèche à celle observée dans la calamagrostidaie. Rappelons toutefois que l'ETR de la hêtraie a été quelque peu sous-estimée par suite de l'existence de racines pénétrant dans les graviers calcaires sur lesquels repose le sol actuel.

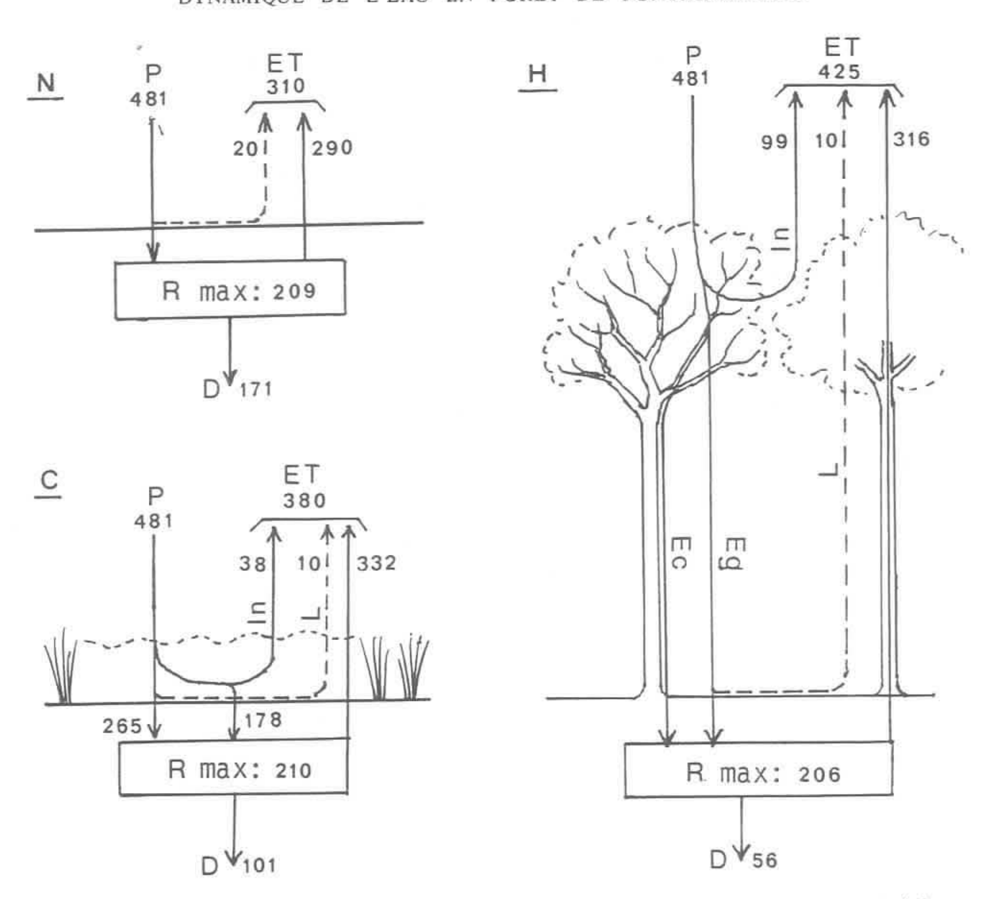


FIG. 6. — Bilan hydrique de 1976, en mm, d'une station sans végétation (N) ou colonisée par *Calamagrostis* (C) dans une coupe, et d'une futaie de hêtres (H). P : précipitations; R max : réserve maximum en eau du sol; In : interception nette par la végétation; L : interception nette par la litière; Eg : égouttement; Ec : écoulement; ET : évapotranspiration; D : drainage.

L'importance relative de l'interception des précipitations par la hêtraie explique également la plus grande lenteur de reconstitution de la réserve en eau du sol, même en phase défeuillée : 260 mm de précipitations ont été nécessaires pour recharger le sol dont la déficit avait atteint 132 mm à la fin de la seconde période sèche de 1976, soit le double de ce dernier. La calamagrostidaie a dû recevoir 220 mm pour le même résultat, mais le sol nu 93 seulement.

Comme le bilan global, la dynamique de l'eau à l'intérieur du profil diffère selon les stations bien que les caractères hydriques soient identiques; un horizon moyen, A_2, à faible capacité équivalant à 52-55 mm d'eau, est encadré par deux horizons à forte capacité : l'un, A_1, est peu épais et représente seulement 17 à 18 mm de réserve maximum, l'autre B (+ A_2B), représente 112 à 115 mm, soit plus de la moitié de la réserve totale. La figure 2 montre cette stratification en fin d'année, lorsque le profil est entièrement rechargé à la capacité de rétention. Dans le cas du sol nu, la perte d'eau en période sèche ne concerne que l'horizon A_1 et en partie, exceptionnellement en totalité, l'horizon A_2. Dans les sols couverts de végétation, les horizons à plus forte capacité hydrique, A_1 et B, fournissent l'essentiel du courant transpiratoire par suite de leur plus grande richesse en racines, au point qu'en début de sécheresse le potentiel demeure plus élevé en A_2 (fig. 3). Puis, à l'approche du point de fanaison, il

y a égalisation du potentiel vertical, à l'exception toutefois de l'horizon supérieur qui demeure biologiquement moins sec sous la calamagrostidaie alors qu'il devient au contraire plus sec sous la hêtraie. Au-dessous de l'horizon humifère, l'assèchement au début dépendant de la concentration racinaire, atteint à un équilibre entre l'absorption et le potentiel hydrique. Une telle évolution a été observée par différents auteurs, tels que PATRIC *et al.* (1965) pour des surfaces boisées.

Au cours des trois années d'observations, ces différences dans le fonctionnement hydrique des écosystèmes sont demeurées qualitativement les mêmes, mais changeaient quantitativement avec les conditions climatiques. Le Tableau XIV montre les différences dans les déficits du sol pour une année moyenne (1974), une année humide (1975) et une année sèche (1976).

TABLEAU XIV

Déficit en eau des sols au cours de trois années à pluviométrie différente

	Déficit en eau maximum, mm	Déficit en fin de saison d'activité (15 oct.), mm
1974		
Calamagrostidaie	131	32
Hêtraie	100	32
1975		
Sol nu	35	0
Calamagrostidaie	106	0
Hêtraie	82	0
1976		
Sol nu	78	0
Calamagrostidaie	137	60
Hêtraie	132	78

Les résultats obtenus par nous en forêt de Fontainebleau vont dans le même sens que ceux qui ont été publiés en d'autres régions par des méthodes semblables. Ainsi MARSTON (1962) en Ohio constate que le déficit hydrique du sol en fin de saison de croissance et que l'évapotranspiration pendant celle-ci sont, dans l'ordre croissant : coupe à sol nu — prairie à *Andropogon* — chênaie; cependant le déficit maximum est plus élevé sans la chênaie que sous la Graminée. Dans le Missouri, FLETCHER et LULL (1963) rapportent que toute l'eau du sol disponible pour les plantes est épuisée en 32 jours après le début de la sécheresse sous une forêt de *Quercus* et *Carya* alors qu'il en reste la moitié dans le sol nu sans litière et beaucoup plus dans le sol nu avec conservation de la litière. Pour le même type forestier, SARTZ (1972) constate une baisse estivale de la réserve totale d'eau du sol deux fois plus grande sous la forêt intacte que dans une coupe avec conservation des strates basses et trois fois plus grande que dans une coupe accompagnée de destruction totale de la végétation. Dans la forêt de chêne-liège au Maroc, G. de BEAUCORPS (1957) remarque que sous peuplement dense, l'eau utile est épuisée dès juillet et la réserve à peine reconstituée en février alors qu'en sol nu et dans les peuplements ouverts, la dessiccation reste plus superficielle et se trouve rapidement compensée en saison des pluies.

Dans le cas d'une chênaie du Missouri alimentée par une nappe temporaire, FLETCHER et MCDERMOTT (1957) évaluent l'ETR, par mesures de l'humidité du sol et du niveau de la nappe, à 4,5 mm par jour sous la chênaie et à 1,06 mm seulement dans une clairière nue adjacente pendant un printemps sans pluies. Cette dernière valeur est très proche de celle que nous avons obtenue pour le sol nu d'une coupe en période de sécheresse prolongée.

Dans une revue des travaux sur le « rendement en eau » (drainage + écoulement superficiel) en régions semi-arides, SHACHORI et MICHAEL (1965) mettent en évidence un différence moyenne de 120 mm entre forêts et maquis d'une part, formations herbacées et surfaces nues d'autres part, en faveur de ces dernières. Or nos estimations font ressortir en année sèche (fig. 6) une différence de 115 mm dans le même sens entre la hêtraie et le sol nu, mais de 70 seulement entre la calamagrostidaie et le sol nu.

Les expériences de déboisements de bassins-versants en régions montagneuses humides ont mis en évidence des augmentations de débit supérieures, de l'ordre de 20 cm la première année après la coupe selon les résultats en provenance de différentes parties du Monde (HIBBERT, 1967), mais atteignant

33 cm, soit 39 % de plus que le témoin non déboisé dans le New-Hampshire (LIKENS *et al.*, 1970) et 40 cm en Caroline du Nord (HOOVER, 1944). En Suisse, H. BURGER (in PARDÉ, 1974) trouva une différence moyenne, sur 25 ans, de 34 cm d'écoulement en faveur d'un bassin à faible taux de boisement. En basse Bretagne, la comparaison de l'écoulement hors d'un bassin boisé et de deux bassins soumis à l'exploitation agricole a mis en évidence de 18 à 25 cm en faveur de ces derniers (COSANDEY 1978). Toutes ces valeurs, qui sont comparables, montrent que le relief, en introduisant un facteur de ruissellement et de drainage latéral, accentue l'augmentation de rendement en eau des surfaces déboisées.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont au Directeur et au personnel du Centre de gestion de l'O.N.F. pour la forêt de Fontainebleau, qui ont permis la réalisation de ce travail. Ils vont également à MM. DAUDET, VALANCOGNE et DARTHOUT, chercheurs de l'I.N.R.A., et à M. NORMAND, du C.T.G.R.E.F., qui nous ont fait bénéficier de leurs compétences.

BIBLIOGRAPHIE

AUSSENAC (G.), 1968. — Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sc. Forest.*, **25** (3), 135-156.

AUSSENAC (G.) 1970. — Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. *Ann. Sc. Forest.*, **27**, 383-399.

AUSSENAC (G.), 1975. — Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions: conséquences écophysiologiques chez quelques résineux. *Thèse Univ. Nancy*, multigr., 234 p.

BEAUCORPS (G. de), 1957. — Evolution de l'humidité des sols dans une futaie claire de chêne-liège. *Station de rech. for. de Rabat. Rapp. annuel 1956*, fasc. Ij, 89-103.

BENECKE (P.), 1972. — The water regime of beech stands in the Solling range. *Forst. u. Holzw.*, **27**, 48-52.

BETREMIEUX (R.), 1975. — Réflexions à propos de la capacité au champ et de sa mesure. Actualisation et réhabilitation. G.E.P.P.A., 22[e] Réunion, 3 et 4 juin, 41 p.

BLOW (F. E.), 1955. — Quantity and hydrologic characteristics of litter under upland oak forests in eastern Tennessee. *J. Forestry*, **53**, 190-195.

BODEUX (A.), 1954. — Recherches écologiques sur le bilan d'eau sous la forêt et la lande de Haute Campine. *Agricultura*, vol. II, 2[e] sér., n° 1, 1-80.

BONNEAU (M.), 1961. — Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. *Bull. A.F.E.S.*, n° 8, 16-26.

BONNEAU (M.), 1963. — L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière. *Rev. for. franç.*, n° 1, 19-31.

BONNEAU (M.), 1970. — Le sol et l'eau. In : *Précis de Pédologie*, DUCHAUFOUR Ph., 3[e] édition, 52-86.

BOUCHON (J.), FAILLE (A.), LEMÉE (G.), ROBIN (A. M.) et SCHMITT (A.), 1973. — *Cartes et notice des sols, du peuplement forestier et des groupements végétaux de la Réserve biologique de la Tillaie en forêt de Fontainebleau*. Lab. Ecologie Végétale, Orsay, 10 p, 3 cartes.

BURGY (R. H.), POMEROY (C. R.), 1958. — Interception losses in grassy vegetation. *Trans. amer. Geophys. Un.*, **39**, 1095-1100.

CLARK (O.R.), 1940. — Interception of rainfall by prairie grasses, weeds and certain crop plants. *Ecol. Monogr.*, **10**, 245-277.

COLOMBANI (J.), LAMAGAT (J. P.), THIEBAUX (J.), 1972. — Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, Sér. Hydrol., **IX** (3), 15-46.

DAUDET (F. A.), 1970. — Méthodes et technique d'étude de l'état de liaison et de la teneur en eau dans le sol et la plante. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I.N.R.A., Publ. n° 70-4, 283-313.

COSANDE (C. M.), 1978. — Recherches sur le bilan hydrologique d'un bassin versant forestier. *Cahiers du CENECA*, Coll. int. Paris, 5 p.

DOIGNON (P.), 1976. — Quatre-vingt douze ans d'observations météorologiques à Fontainebleau (1883-1974). Mises à jour et révisions. *Bull. Assoc. Nat. Vallée du Loing*, **52** (1-2), 18-21.

DUCHAUFOUR (P.), 1970. — Précis de Pédologie, 3e Ed., Masson, Paris, 481 p.

EIDMANN (F. E.), 1959. — Die Interception in Buchen- und Fichtenbestandes; Ergebnis mehrjähriger Untersuchungen im Rothaargebirge (Sauerland). *Int. Ass. Scientitic Hydrol.*, **48**, 5-26.

ETTEHAD (R.), LOSSAINT (P.), RAPP (M.), 1973. — Recherche sur la dynamique et le bilan de l'eau des sols de deux écosystèmes méditerranéens à chêne vert. *Editions du C.N.R.S.*, P.B.I.-R.C.P. n° 40, 3, 197-288.

FAILLE (A.), 1977. — Action des peuplements de *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth dans la dynamique des écosystèmes de la forêt de Fontainebleau. II. Influence sur quelques caractères des humus et leurs activités microbiennes. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **14** (2), 289-306.

FAILLE (A.), FARDJAH (M.), 1977. — Structure et évolution des peuplements de *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth en forêt de Fontainebleau. *Œcol. Plant.*, **12** (4), 323-341.

FARDJAH (M.), 1978. — Dynamique comparée de l'eau du sol sous futaie et en clairière à *Calamagrostis epigeios* en forêt de Fontainebleau. Thèse Univ. de Paris-Sud, 146 p.

FLETCHER (P. W.), LULL (M. W.), 1963. — Soil moisture depletion by a hardwood forest during drought years. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 94-98.

FLETCHER (P.W.), MCDERMOTT (R.E.), 1957. — Moisture depletion by forest cover on a seasonally saturated Ozark ridge soil. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **21**, 547-550.

HENIN (S.), 1957. — Les principes généraux de l'économie de l'eau dans les régions arides. *C. R. Ac. Agric.*, **43**, 519-523.

HENIN (S.), MONNIER (G.), 1961. — Mécanisme de l'action d'une couverture sur le bilan d'eau du sol. *C. R. Ac. Sci.*, **252**, 939-941.

HIBBERT (A. R.), 1967. — Forest treatment effects on water yield. *Proc. int. symposium on forest hydrology*, Pergamon Press, N. Y., 527-543.

HILLEL (D.), 1974. — L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Vander Ed., Muntstraat, 10 B, 3000 Louvain, 288 p.

HOOVER (M. D.), 1944. — Effect of removal of forest vegetation upon water yields. *Trans. amer. geophysic Union*, **6**, 969-975.

LEMÉE (G.) et coll., 1978. — La hétraie naturelle de Fontainebleau. *In : Problèmes d'Ecologie. Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres*, Dir. M. LAMOTTE et F. BOURLIÈRE, Masson Paris, 75-128.

LIKENS (G. E.), BORMANN (F. H.), JOHNSON (N. M.), FISHER (D. W.), PIERCE (R. S.), 1970. — Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed ecosystem. *Ecol. Monogr.*, **40**, 23-47.

MARSTON (R. B.), 1962. — Influence of vegetation cover on soil moisture in Southeastern Ohio. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 605-608.

NIHLGARD (B.), 1969. — Distribution of rainfall in beech and spruce forest, a comparison. *Bot. Notiser*, **122** (2), 556-582.

NOIRFALISE (A.), 1959. — Sur l'interception de la pluie par le couvert dans quelques forêts belges. *Bull. Soc. Roy. For. Belgique*, **66** (10), 433-439.

NOIRFALISE (A.) et VANESSE (R.), 1975. — Conséquences de la monoculture des cônifères pour la conservation des sols et pour le bilan hydrique. *Bull. Ass. des espaces verts*, Bruxelles, 44 p.

PARDÉ (J.), 1974. — Le microclimat en forêt. *In : Ecologie forestière*, dir. P. PESSON, Gauthier-Villars Paris, 1-20.

PATRIC (J. M.), DOUGLASS (J E.), HEWLETT (J. D.), 1965. — Soil water absorption by moutain and piedmont forests. *Soil Sci. Soc. Proc.*, **29**, 303-308.

RIJTEMA (P. E.), 1966. — Evapotranspiration. *Inst. land and water managements res.*, Wageningen, *Techn. Bull.* n° 47, 72-89.

ROBIN (A. M.), 1968. — Contribution à l'étude des processus de podzolisation sous forêt de feuillus. Thèse Fac. Sci. Paris, 88 p. et *Sci. du Sol*, n° 1, 1970.

RODE (A.), 1970. — Méthodes d'étude du régime hydrique des sols. *Ac. Sc. U.R.S.S*, Moscou, 154-161.

RUTTER (A. J.), 1964. — Studies in the water relations of *Pinus silvestris* in plantation conditions. II. The annuel cycle of soil moisture change and derived estimate of evaporation. *J. appl. Ecol.*, **1**, 28-44.

RUTTER (A. J.), FOURT (D. F.), 1965. — Studies on the water relation of *Pinus silvestris* in plantation conditions. III. A comparaison of soil water changes and estimated of total evaporation on four afforested and one grass covered site. *J. appl. Ecol.*, **2**, 197-209.

RUTTER (A. J.), 1966. — Studies on the water relation of *Pinus silvestris* in plantation conditions. IV. Direct observations on the rates of transpiration, evaporation of intercepted water and evaporation from the soil surface. *J. appl. Ecol.*, **3**, 393.

SARTZ (R. S.), 1972. — Soil water depletion by a hardwood forest in southwestern Wisconsin. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36** (6), 961-964.

SCHNOCK (G.), 1967. — Réception des précipitations et écoulement le long des troncs en 1966. Recherches sur l'écosystème forêt. Série B : La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont, Contribution n° 17. *Bull. Inst. Roy. Sci. Nat. Belg.*, 1-15.

SCHNOCK (G.), 1968. — Bilan des apports hydriques pour 1966 et 1967. Recherches sur l'écosystème forêt. Série B : La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. Contribution n° 25. *Bull. Soc. Roy. For. de Belg.*, 1-19.

SCHNOCK (G.), 1971. — Le bilan de l'eau dans l'écosystème forêt. Application à une chênaie mélangée de haute Belgique. *Productivité des écosystèmes forestiers,* Actes du colloque de Bruxelles 1969, Unesco Paris, 41-47.

SCHNOCK (G.) et GALOUX (A.), 1967. — Réception des précipitations et égouttement. La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. *Bull. Inst. Roy. Sci. Nat. Belg.*, **43**, 1-30.

SHACHORI (A. Y.), MICHAELI (A.), 1965. — Water yields of forest, maquis and grass covers in semi-arid regions : a literature review. *Recherches sur la zone aride, Méthodologie de l'éco-physiologie végétale,* Actes du Colloque de Montpellier, Unesco, 467-477.

SLAVIK (B.), 1965. — Rain interception in deciduous forests. Actes du Colloque de Montpellier, *Méthodologie de l'Eco-physiologie végétale,* Unesco, 193-199.

SPANNER (D. C.), 1951. — The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *J. Exp. Botany*, **2**, 145-168.

TURC (L.), 1961. — Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, **12** (1), 13-49.

VALANCOGNE (C.), DAUDET (F. A.), 1974. — Adaptation de la technique micropsychrométrique à l'enregistrement du potentiel hydrique dans le sol en place : problèmes posés par la température. *Ann. Agron.*, **25** (5), 733-751.

VERNET (A.), RHAIEM (H.), DAUDET (F. A.), 1970. — Micropsychromètre à effet Peltier pour la mesure du potentiel hydrique. *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère,* I.N.R.A., Publ. n° 70-4, 315-324.